تحلیل عددی اثر خصوصیات مقاومتی فصل مشترک شمع – خاک بر سختی جانبی منحنی‌های p-y*

(یادداشت پژوهشی)

حسن شرفی[(۱)] یزدان شمس ملکی[(۲)]

چکیده بررسی ظرفیت باربری جانبی شمع‌های تحت بارجانبی در مجاورت زمین‌های شیب‌دار و همچنین زمین‌های مسطح از جمله موضوعات موردبحث در زمینهٔ مهندسی شالوده‌های عمیق در دهه‌های اخیر می‌باشد. برآورد میزان سختی جانبی لایه‌های خاک، یا به‌شکل دیگر ضریب واکنش بستر جانبی، چالشی قدیمی در زمینهٔ تشکیل منحنی‌های p-y تجربی (آزمایشگاهی) و تئوری بوده است. در این مقاله به‌کمک تحلیل‌های عددی صورت‌گرفته در نرم‌افزار تفاضل محدود سه‌بعدی $FLAC^{3D}$ اقدام به برآورد سختی جانبی خاک تابع عمق z در طول شمع‌های بتنی در عمق‌های مختلف در زمین‌های شیب‌دار و مسطح و در انواع خاک‌های چسبنده، اصطکاکی (دانه‌ای) و مختلط از نوع c-ϕ شده است. به‌منظور برآورد سختی جانبی خاک در عمق‌های مختلف به‌کمک این روش عددی، منحنی‌های p-y در عمق‌های مختلف در طول شمع بتنی با مقطع دایروی تحت بارگذاری جانبی استاتیکی تا حد تسلیم خاک استخراج شده است. از چندجمله‌ای درجه ششم برای تقریب رابطهٔ مابین سختی جانبی خاک و پارامترهای بدون بعد مشخصه های هندسی و مقاومتی خاک، شمع و فصل مشترک شمع–خاک استفاده شده‌است که برای مؤلفهٔ چسبندگی خاک به چندجمله‌ای درجه چهار کاهش یافته است. در پایان مقاله به‌منظور صحت‌سنجی روش عددی استخراج منحنی‌های p-y در این تحقیق، تعدادی آزمایش‌های معتبر بارگذاری جانبی شمع باروش تحقیق حاضر، مورد بررسی قرار گرفته‌اند و منحنی‌های بار– تغییرمکان سر شمع برای آنها محاسبه شده است. نتایج صحت‌سنجی، توافق خوبی مابین نتایج آزمایش‌ها و روش عددی تحقیق حاضر به‌دست می‌دهد.

واژه های کلیدی شمع تحت بار جانبی، سختی جانبی خاک، منحنی‌های p-y، تحلیل سه‌بعدی تفاضل محدود، روابط تجربی.

Numerical Analysis of Pile-Soil Interface Strength Properties Effects on the Lateral Stiffness of p-y Curves

H. Sharafi Y. Shams Maleki

Abstract *Investigation of lateral bearing capacity of piles under lateral loading in the vicinity of soil slopes and level ground is one of the interesting issues in the engineering of the deep foundations in recent decades. In the meantime, the estimation of lateral stiffness of soil layers, coefficient of soil reaction, k_s, is an old challenge on the basis of the creation of empirical (testing) and theoretical p-y curves. In this paper, we attempt to estimate lateral soil stiffness in the length of concrete piles in various depths in sloped ground and level ground and in the all type of soils, including cohesive soil, frictional (granular) soil and mixed soil, i.e. c-φ soil with the aid of numerical analysis in three dimensional finite difference software, $Flac^{3D}$. For the purpose of estimating lateral soil stiffness, K_i, in different depths by means of this numerical method, the p-y curves have been derived in several depths in the length of concrete pile with circular section under static lateral loading up to the threshold of the yielding of soil materials. The empirical relationship established between soil lateral stiffness K_i and the effective dimensionless parameters on the K_i in general is calculated as a six order polynomial, and this six order polynomial reduces to a fourth order polynomial for the cohesion component of the soil. At the end of the paper, some well documented lateral loading tests by the present numerical method have been investigated for validation of the numerical method of derivation of the p-y curves and pile-head load deflection curves, H-y curves have been calculated and are compared with other results obtained by other researchers and methods. There are good agreements between test results and the results obtained from the numerical method presented in this paper.*

Key Words Pile under Lateral Loading, Soil Lateral Stiffness, p-y Curves, Three Dimensional Finite Difference Analysis, Empirical Relationships.

---

* تاریخ دریافت مقاله ۹۳/۱۰/۵ و تاریخ پذیرش آن ۹۵/۲/۱ می‌باشد.

(۱) نویسندهٔ مسئول، استادیار، گروه عمران، دانشکدهٔ مهندسی، دانشگاه رازی، کرمانشاه. Email: H_sharafi@razi.ac.ir

(۲) دانشجوی دورهٔ دکتری، مکانیک خاک و پی، دانشکدهٔ فنی مهندسی، دانشگاه رازی، کرمانشاه.

مقدمه و دامنهٔ پژوهش

شمع‌های بتنی درجاریز تحت بار جانبی استاتیکی ازجمله شالوده‌های عمیق پرکاربرد در پروژه‌های مختلف مهندسی عمران می‌باشند. پیچیدگی‌های بارگذاری جانبی شمع‌ها، درمقایسه با بارگذاری محوری شمع، موضوع شمع‌های تحت بار جانبی را از جنبه‌های گوناگونی از سایر انواع بارگذاری‌های شالوده‌های شمعی متمایز ساخته است. ازجمله جنبه‌های این تمایز، پیچیدگی رفتار واقعی خاک به‌عنوان محیطی پیوسته متشکل از سه فاز دانه‌های جامد، آب و هوا می‌باشد. در سال‌های اخیر به‌منظور برآورد ظرفیت باربری جانبی شمع‌ها عمدتاً از روابط مربوط به نظریهٔ تیر بر شالودهٔ غیرخطی وینکلر (BNWF) استفاده شده است [1]. در این نظریه محیط پیوستهٔ خاک اطراف شمع با تعدادی فنر با سختی غیرخطی مدل‌سازی می‌شود و رفتار شمع بتنی به‌مثابهٔ تیری ارتجاعی که بر این بستر فنری اتکا دارد، مدل‌سازی می‌گردد. درحقیقت در این روش، سختی فنرهایی که برای مدل‌سازی خاک در طول شمع و در عمق خاک به‌کار می‌روند، در واحد عمق (همان طول شمع) متغیر است و در حین افزایش عمق افزایش می‌یابد. برآورد میزان عددی این سختی جانبی که رابطهٔ تنگاتنگی با ضریب عکس‌العمل بستر جانبی دارد، موضوع تحقیق مقالات متعددی در طول چند دههٔ اخیر بوده است. پس از این مرحله برمبنای میزان سختی جانبی محاسبه شده در عمق‌های مختلف در طول شمع، محققان به ارائهٔ روابط و منحنی اندرکنش خاک- شمع برای بارگذاری جانبی، منحنی‌های p-y پرداخته‌اند. در ویرایش اخیر مبحث هفتم مقررات ملی ساختمان [۲]، سه گونه سازوکار برای گسیختگی خاک و شمع در حین بارگذاری جانبی درنظر گرفته شده است. در سازوکار اوّل فقط خاک اطراف شمع گسیخته می‌گردد و در سازوکار دوم در خود شمع به‌دلیل ضعف سازه‌ای شمع، گسیختگی سازه‌ای اتفاق می‌افتد و نهایتاً در سازوکار سوم، گسیختگی مرکب رخ می‌دهد، به‌طوری‌که در آن هردوی مصالح شمع و خاک دچار ضعف و گسیختگی می‌شوند [۲]. بدیهی است که به‌دلیل تفاوت عمدهٔ بین خصوصیات مقاومتی شمع (بتنی یا فولادی) و خاک (ازجمله اختلاف سختی مصالح شمع و خاک) در حین بارگذاری جانبی، در عمق‌های سطحی‌تر، ابتدا مکانیزم گسیختگی خاک رخ می‌دهد. منحنی‌های اندرکنش جانبی p-y هذلولوی در سال‌های اخیر به‌دفعات مختلف در منابع و مقالات متعدد پیشنهاد شده‌اند. از طرفی به‌سبب رفتار غیرخطی ارتجاعی- خمیری خاک و وجود گام خمیری (یعنی خط افقی در شکل این منحنی‌ها)، به‌نظر می‌رسد که به خوبی می‌توانند بیانگر رفتار غیر- خطی باربری جانبی خاک باشند.

مرور ادبیات فنی موضوع

در این تحقیق منحنی‌های p-y برای عمق‌های مختلف در طول یک شمع بتنی دایروی به‌کمک روش تفاضل محدود سه‌بعدی صریح در نرم‌افزار FLAC3D استخراج شده‌اند [3]. سپس مقادیر شیب بخش ابتدایی این منحنی‌ها به‌منظور محاسبهٔ سختی جانبی خاک و تشکیل منحنی‌های p-y هذلولوی در عمق‌های مختلف در طول شمع مورد محاسبه قرار گرفته است. منحنی‌های p-y برای بررسی رفتار اندرکنشی شمع و خاک تحت بارگذاری جانبی در طول چند دههٔ اخیر موردمطالعه قرار گرفته است [4]. مؤلفهٔ p در این منحنی‌ها پاسخ، عکس‌العمل یا فشار خاک برحسب واحد (نیرو/ واحد طول شمع) و مؤلفهٔ y در این منحنی‌ها مقدار تغییرشکل (تغییرمکان) جانبی شمع نسبت به راستای عمود برجهت محوری شمع (یعنی طول شمع) برحسب واحد (طول) می‌باشد. تاکنون منحنی‌های p-y برای انواع خاک‌های رسی نرم تا سخت زهکشی‌شده یا نشده، خاک‌های ماسه‌ای در زیر تراز آب زیرزمینی یا بالای آن و برخی از سنگ‌ها استخراج شده است [4]. رویکرد جدیدی که طی سال‌های اخیر برای بررسی شکل منحنی‌های p-y مورد بررسی قرار گرفته است، رهیافت منحنی‌های p-y هذلولوی می باشد. اخیراً [5,6] به استخراج منحنی‌های p-y به‌کمک روش اجزای محدود سه‌بعدی در نرم‌افزار PLAXIS3D Foundation [7] برای شمع‌های بتنی

با مقطع دایروی مجاور شیب‌های رسی زهکشی‌نشده اقدام شده است. آنها نیز از معیار منحنی p-y هذلولوی استفاده کرده‌اند [5]. میزان حداکثر تغییرمکان جانبی‌ای، y_{max}، که برای شمع درنظر گرفته شده‌است، در محدوده‌ای مابین ۰/۵ تا ۱ برابر قطر شمع‌ها می‌باشد [5]. قطر شمع‌ها هم در تحلیل‌های مختلف برابر ۰/۵ تا ۲ متر درنظر گرفته شده است. در این تحقیق اثر خصوصیات مقاومتی فصل مشترک شمع- خاک از قبیل چسبندگی و زاویهٔ اصطکاک داخلی این ناحیه، بر میزان سختی اولیه (یعنی شیب بخش ابتدایی) منحنی‌های p-y موردمطالعه قرار گرفته است. تحلیل‌های عددی تفاضل محدود سه‌بعدی (3D-FDA) مجزایی [3] درخصوص برآورد سختی جانبی مؤلفه‌های مختلف خاک شامل مؤلفه‌های چسبندگی، مؤلفهٔ اصطکاک داخلی و اثر توأمان این دو مؤلفه از خاک، در خاک‌های از نوع $c-\phi$ صورت گرفته است. معیار مقاومت برشی کولمب [3]، بدین منظور در تحلیل‌های نرم‌افزاری برای تعریف رفتار مصالح در فصل مشترک شمع- خاک به‌کار برده شده است. از این معیار در سال‌های اخیر برای تعریف فصل مشترک شمع- خاک در تحلیل‌های تفاضل محدود استفاده‌های زیادی شده است، از آن جمله می‌توان به مطالعهٔ گروه شمع‌ها در خاک چسبنده [8] و گروه شمع‌ها در خاک دانه‌ای [9] اشاره نمود. بارگذاری صورت‌گرفته در سرشمع‌های این تحقیق از نوع بارگذاری استاتیکی می‌باشد. درحقیقت در این تحقیق، بررسی اثر بارگذاری استاتیکی [3] بر میزان سختی جانبی خاک بسیج شده در عمق‌های مختلف اطراف شمع تحت بارجانبی در دو حالت زمین مسطح و مجاور شیب خاکی مورد تحقیق قرار گرفته است.

مروری بر منحنی‌های هذلولوی

به‌منظور بررسی اندرکنش خاک و شمع‌های تحت بار جانبی استاتیکی، منحنی‌های اندرکنش انتقال بارجانبی، به‌شکل منحنی‌های p-y پیشنهاد شده است. این منحنی‌ها برای انواع خاک‌های چسبنده، اصطکاکی و مخلوط چسبنده- اصطکاکی ارائه شده اند [4]. انواع حالات و شرایط اثرگذار مختلف برای خاک در زمینه‌های زهکشی یا عدم زهکشی، مجاورت شمع با شیب یا زمین مسطح، میزان تراکم خاک، عمق خاک، اثر موقعیت تراز آب زیرزمینی، مشخصات هندسی و مکانیکی شمع در این منحنی‌های پیشنهادی درنظر گرفته شده است [4]. علی‌رغم این نکات قوت، ضعف‌ها و نواقصی نیز در برآورد منحنی‌های p-y به‌کمک این روش‌های نظری و آزمایشگاهی وجود دارد. از آن‌جمله می‌توان به نوع مصالح شمع استفاده‌شده در بیشتر آزمایش‌های بارگذاری جانبی شمع اشاره نمود که بیشتر از نوع شمع‌های فولادی هستند و کمتر شمع بتنی، به‌دلیل سختی شرایط ساخت و بارگذاری، موردتوجه قرار گرفته است [4]. با اینکه به‌طورکلی رفتار مقاومت مصالح فولادی و بتن مسلح کاملاً متفاوت است. ازجملهٔ دیگر مشکلات، تمرکز این روش‌ها بر تغییرمکان‌های بسیار کوچک سرشمع است و پیش‌بینی مناسبی از رفتار p-y شمع در تغییرمکان‌های بزرگ‌تر سرشمع به‌دست نداده‌اند. ازجمله ضعف‌های دیگر موجود درخصوص استخراج منحنی‌های p-y برای عمق‌های مختلف در روش‌های نظری فعلی، الگوی تکراری و موازی در شکل این منحنی‌ها، برای عمق‌های مختلف در طول شمع است. در حالی که در آزمایش‌های واقعی [10] دیده‌شده که الگوی منحنی‌های اندرکنشی p-y در عمق‌های مختلف در طول شمع متفاوت از یکدیگر است و همگی آنها در شرایط تغییرمکان y و فشار جانبی خاک p ثابت، رفتار و شکلی یکسان و موازی ندارند.

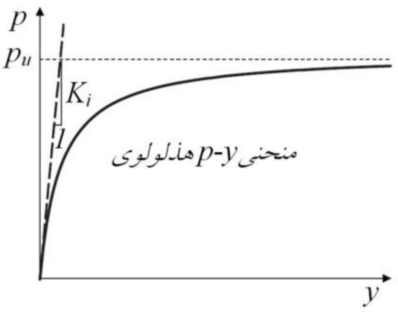
به‌علاوه بیشتر روش‌های نظری موجود شکل درستی از مراحل ارتجاعی خطی، ارتجاعی غیرخطی و خمیری در رفتار خاک در حین بارگذاری جانبی روی شمع را نشان نمی‌دهند [4]. باتوجه به طبیعت رفتار ارتجاعی- خمیری به‌شدت غیرخطی خاک، در سال‌های اخیر، مدل «هذلولوی»، یا «هایپربولیک»، شکل (۱)، در تعریف منحنی‌های p-y مورداستفادهٔ فراوانی قرار گرفته است.

این معیار تا حدود بسیار زیادی به رفتار ارتجاعی-

خمیری غیرخطی خاک نزدیک است و براساس یافته‌های عددی مطالعهٔ حاضر مشخص شده است که در بارگذاری‌های استاتیکی منحنی‌های p-y برای انواع مؤلفه‌های خاک ازقبیل چسبندگی، اصطکاک و اثر توأمان این دو، به شکل هذلولوی است. درحقیقت در فضای دوبعدی p-y منحنی‌ها دارای یک بخش ارتجاعی (خطی و غیرخطی) شیب‌دار و یک بخش خمیری (خط افقی در منحنی‌ها) هستند، که به‌خوبی رفتار ارتجاعی- خمیری غیر خطی خاک را نشان می‌دهند. شکل کلی رابطهٔ منحنی p-y هذلولوی به‌شکل معادلهٔ (۱) در زیر ارائه شده است [5,6]:

$$p = \frac{y}{\frac{1}{K_i} + \frac{y}{p_u}} : \text{unit}(\frac{F}{L}) : (\frac{N}{m}) \qquad (۱)$$

که در این رابطه y تغییرشکل جانبی شمع، p فشار (مقاومت یا عکس‌العمل) ایجادشده در خاک در واحد طول شمع، p_u مقاومت نهایی خاک در واحد طول شمع و K_i سختی بخش ابتدایی منحنی‌های p-y برحسب یکای تنش (یعنی نیرو/ سطح) می‌باشد.



شکل ۱ منحنی p-y هذلولوی به‌همراه نمایش سختی جانبی K_i

جزئیات مدل‌سازی عددی

در این مطالعه مدل‌سازی عددی شمع‌های تحت بار جانبی در زمین‌های مسطح و شمع‌های مجاور شیب به‌کمک نرم‌افزار FLAC3D صورت گرفته است [3]. شمع‌های مدل شده از نوع بتنی انعطاف‌پذیر هستند. سرشمع در مقابل انتقال مقید و در مقابل دوران آزاد نگه داشته شده است [11]، بنابراین سر شمع از نوع سرشمع آزاد می‌باشد [11].

انتهای شمع در محیط خاک به‌صورت شناور قرار گرفته و درمقابل دوران و انتقال آزاد می‌باشد. المان‌های فصل مشترک استوانه‌ای‌شکل، سه‌گره‌ای، در اطراف سطح جانبی شمع به‌کار برده شده است. برای تعریف رفتار مصالح فصل مشترک شمع – خاک از معیار مقاومت برشی کولمب استفاده شده است [3].

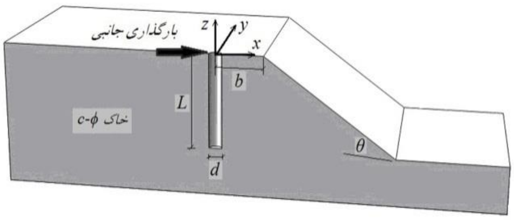
این معیار قادر به درنظر گرفتن پارامترهای مقاومتی از خاک ازقبیل چسبندگی، زاویهٔ اصطکاک داخلی و زاویهٔ اتساع در محل فصل مشترک شمع- خاک می‌باشد [3]. همچنین این معیار قادر به نفوذپذیر یا ناتراوا فرض کردن المان‌های فصل مشترک از طریق لحاظ یا عدم‌لحاظ فشارهای آب حفره‌ای می‌باشد.

برای مدل‌سازی سختی نسبی بین محیط خاکی و مصالح بتنی شمع، از سختی‌های نرمال k_n و برشی k_s در تعریف فصل مشترک شمع- خاک استفاده شده است. مقدار سختی‌های نرمال و برشی برابر ۲۰۰۰ مگاپاسکال بر متر درنظر گرفته شده است. رابطهٔ عمومی تعریف معیار مقاومت برشی کولمب در فصل مشترک شمع- خاک، حداکثر نیروی برشی در محل گره‌های فصل مشترک را به‌شکل زیر محدود می‌کند:

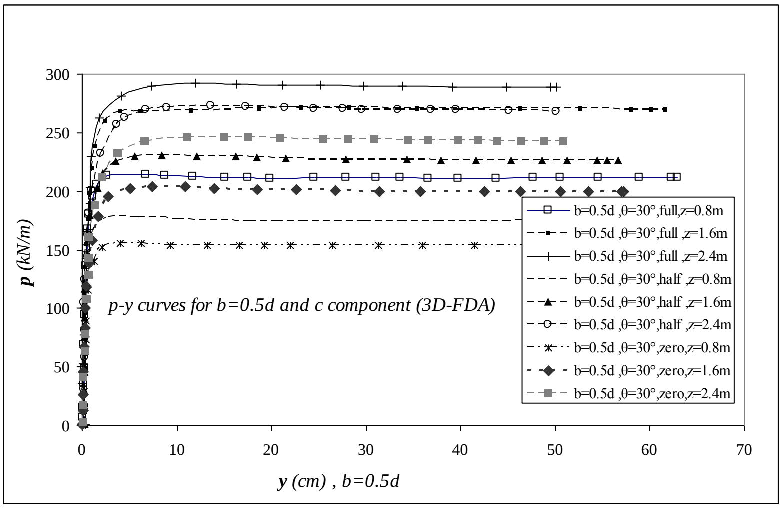
$$F_{s\max} = c_{int}A + \tan\phi_{int}(F_n - pA) \qquad (۲)$$

که در این رابطه c_{int} چسبندگی در طول فصل مشترک، ϕ_{int} زاویهٔ اصطکاک مصالح فصل مشترک، p فشار آب حفره‌ای که در این مطالعه برابر صفر فرض شده است، A مساحت نمایش‌دهندهٔ متناسب با هر گرهٔ فصل مشترک، $F_{s\ max}$ حداکثر نیروی برشی در محل گره‌های المان‌های مثلثی فصل مشترک و F_n نیروی نرمال محاسبه‌شده در محل گره‌های فصل مشترک شمع- خاک است. در این تحقیق سه تحلیل مجزا فقط برای مؤلفهٔ چسبندگی خاک با سه نسبت مقاومتی c_{int}/c_{soil} برابر صفر و نیم و یک و سه تحلیل مجزا برای مؤلفهٔ اصطکاکی خاک، یعنی نسبت زوایه‌ی اصطکاک داخلی مصالح فصل مشترک به مصالح خاکی معادل $\tan\phi_{int} / \tan\phi_{soil}$ برابر صفر (zero) و نیم (half) و یک (full) و همچنین در تحلیل هر دو مؤلفهٔ

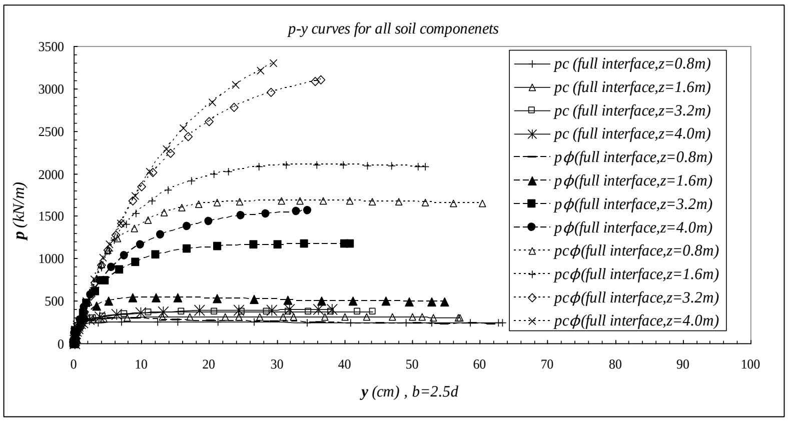
خاک، یعنی خاک مختلط چسبنده - اصطکاکی c−φ، اثر این نسبت‌های مقاومتی سه‌گانه برای هر دو مؤلفهٔ خاک به‌طور هم‌زمان منظور شده است. شمع‌ها در زمین مسطح و زمین شیب‌دار با سه فاصلهٔ مجاورت از شیب، b، مطابق شکل (۲)، برابر ۰/۵، ۲/۵ و ۵/۵ برابر قطر شمع درنظر گرفته شده‌اند. شیب خاک مطابق شکل (۲)، ۳۰ درجه فرض شده و دو شیب اضافی ۲۰ و ۴۵ درجه نیز تحلیل شده است.



شکل ۲ هندسهٔ شمع مجاور شیب خاکی به‌همراه نمایش محل محورهای مختصات دکارتی در تحلیل عددی سه‌بعدی



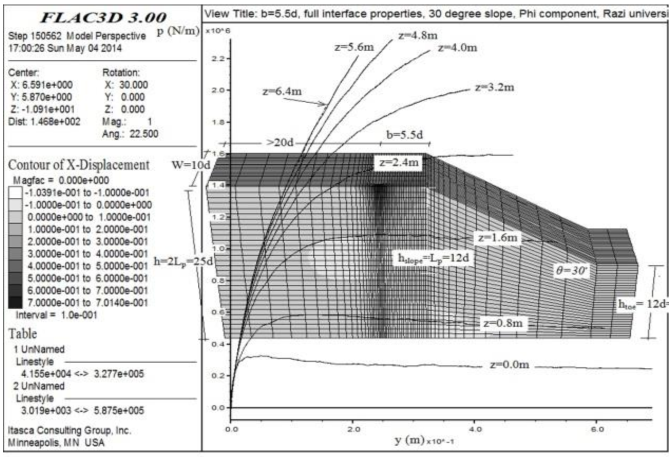
شکل ۳ منحنی‌های p-y برای شرایط مقاومتی فصل مشترک و عمق های مختلف مؤلفهٔ چسبندگی خاک در شیبی ۳۰ درجه و b=0.5d



شکل ٤ منحنی‌های p-y برای شرایط نسبت مقاومتی فصل مشترک کامل و عمق‌های مختلف تمام مؤلفه‌های خاک در شیبی ۳۰ درجه و b=2.5d

نحوهٔ بارگذاری جانبی شمع ازنوع «رمپ یا شیب‌دار» می‌باشد. برای مدل‌سازی این شرایط در نرم‌افزار، سرعتی افقی و بسیار ناچیز برحسب یکای متر بر گام های محاسباتی، مشابه حرکت فک جک بارگذاری جانبی واقعی، به سرشمع اعمال می‌گردد [3]. به بیان دیگر ابتدا مقدار تغییرمکان مطلوب در قالب سرعتی بسیار ناچیز به سرشمع اعمال شده است و سپس مقاومت برشی خاک بسیج‌شده در قبال این تغییرمکان، به‌شکل تنش‌های نرمال و برشی ایجادشده در فصل مشترک شمع- خاک در قالب الگوریتمی در زبان FISH در نرم‌افزار [3] به‌شکل منحنی‌های p-y مطابق شکل‌های (۳) تا (۵) و منحنی‌های H-y (بارافقی- تغییرشکل سرشمع) استخراج گردیده است. این سرعت‌ها براساس تجربیات مدل‌سازی قبلی، باید درحدی کوچک انتخاب گردند که باعث واردآمدن شوک به مدل عددی نشوند [3]. از طرفی همین سرعت‌های بسیار کم، باعث طولانی شدن زمان هر یک از تحلیل‌ها، در حد ۱۲ تا ۲٤ ساعت شده است [۱۲]. برای مدل‌سازی محیط ارتجاعی- خمیری خاک اطراف شمع از مدل ارتجاعی – خمیری کامل «مور- کولمب» استفاده شده است. رفتار شمع ارتجاعی فرض شده و از مدل ارتجاعی خطی برای مدل‌سازی رفتار مصالح شمع بتنی استفاده شده است.

ابعاد بهینهٔ مش‌بندی سه‌بعدی تفاضل محدود طوری درنظر گرفته شده است که از بروز اثرات مرزی ناشی از مش‌بندی جلوگیری شود [۱۲]. در این تحقیق پایداری بلندمدت خاک (شیب خاکی) درنظر گرفته شده است و محیط خاک زهکشی‌شده فرض شده است، یعنی از «اصل تنش‌های مؤثر» استفاده شده است. پروفیل خاک متشکل از دانه‌های شن حاوی خاک رس نرم تا متوسط با تراکم بالا می‌باشد. مشخصات مختلف خاک و شمع در تحلیل‌های سه‌بعدی، در جدول (۱) آورده شده است.



شکل ۵ منحنی‌های p-y برای مؤلفهٔ اصطکاکی خاک، در نسبت مقاومتی فصل مشترک کامل و برای b=5.5d در نرم‌افزار $FLAC^{3D}$

جدول ۱ مشخصات خاک و شمع در تحلیل‌های عددی

مشخصات خاک ارتجاعی- خمیری		مشخصه‌های شمع بتن مسلح ارتجاعی	
ضریب پواسون v_s	۰/٤	ضریب پواسون v_p	۰/۱
مدول ارتجاعی $E_s:(MPa)$	۵۰	مدول ارتجاعی $E_p:(GPa)$	۲۹
چسبندگی $c:(kPa)$	۵۰	قطر شمع $d:(m)$	۱
زاویهٔ اصطکاک داخلی $\phi:(deg)$	٤۵	طول شمع‌ها $L_p:(m)$	۱۲
زاویهٔ اتساع $\psi:(deg)$	۰	زاویهٔ اتساع $\psi:(deg)$	۰
وزن مخصوص $\gamma_t:(kN/m^3)$	۲۲	وزن مخصوص $\gamma_c:(kN/m^3)$	۲۵

خروجی‌های تحلیل‌های پارامتری و تفسیر نتایج حاصل از روش تحلیل عددی

در این تحقیق استخراج «رابطه‌ای تجربی» براساس نتایج عددی حاصل از تحلیل‌های عددی تفاضل محدود متعدد، مدنظر قرار گرفته است. بدین منظور ایجاد پیوندی مابین خصوصیات مقاومتی و هندسی شمع و خاک و همچنین خصوصیات مقاومتی فصل مشترک شمع- خاک، بر سختی جانبی بخش ابتدایی منحنی‌های p-y؛ یعنی Ki، در عمق‌های مختلف دنبال شده است. براساس نتایج حاصل شده، این رابطه به‌شکل کلی زیر درنظر گرفته شده است:

$$K_i = f(x) : unit\left(\frac{F}{L^2}\right) : MPa \quad (۳)$$

که در این رابطه تابع f(x) برابر سختی جانبی K_i منحنی‌های p-y در عمق‌های مختلف است و متغیر x نیز به‌شکل رابطهٔ زیر به‌صورت حاصل جمع چهار پارامتر ثابت و بدون بُعد c_i درنظر گرفته شده است:

$$x = c_1 + c_2 + c_3 + c_4 \quad (٤)$$

$$c_1 = \left(\frac{(d+z)\cos\theta}{10L_p}^{\frac{v_pE_p}{v_sE_s}}\right) \quad (٥)$$

$$c_2 = \frac{c_{int}}{c_{soil}} : c_2 = 0,0.5,1.0 \quad (٦)$$

$$c_3 = \frac{\tan\phi_{int}}{\tan\phi_{soil}} : c_3 = 0,0.5,1.0 \quad (٧)$$

$$c_4 = \frac{d}{b} : c_4 = 0.0(: Level, ground),0.182,0.4,2.0 \quad (٨)$$

که در این روابط d قطر شمع بتنی، z عمق از سطح زمین (زمین مسطح یا شیب‌دار)، L_p طول شمع بتنی، θ زاویهٔ شیب خاکی با راستای افق، v_p و E_p به‌ترتیب نسبت پواسون و مدول ارتجاعی مصالح شمع بتنی، v_s و E_s نیز به‌ترتیب نسبت پواسون و مدول ارتجاعی خاک، c_{int} و c_{soil} به‌ترتیب چسبندگی تعریف‌شده برای مصالح فصل مشترک شمع- خاک و خاک، ϕ_{int} و ϕ_{soil} زاویهٔ اصطکاک داخلی به‌ترتیب در فصل مشترک شمع- خاک و خاک و b فاصلهٔ مرکز شمع از تاج شیب خاکی است. شایان توجه است که به‌دلیل تجربی بودن رابطهٔ فوق «توافق ابعادی» در دو سوی معادلهٔ (۳) برقرار نیست، به‌طوری‌که پارامترهای ثابت اوّل تا چهارم، به لحاظ ابعادی «بدون بُعد» هستند و پارامتر Ki نیز براساس یکای تنشی «مِگاپاسکال» درنظر گرفته شده است.

در این رابطه سعی شده است که اثر تمام پارامترهای تأثیرگذار بر سختی جانبی سیستم شمع- خاک تحت بار جانبی [4]، از قبیل پارامترهای هندسی و مقاومتی شمع و خاک، شیب خاکی و زمین مسطح، گنجانده شود. همچنین از طریق فرآیند ریاضی خم‌آمایی بهترین بَرازش برای یافتن منحنی تقریب‌زنندهٔ تابع f(x) به‌شکل کلی یک چندجمله‌ای خطی درجه ششُم به‌صورت زیر حاصل شده است، که در مورد مؤلفهٔ چسبندگی خاک، چندجمله‌ای درجه چهارم در تمام موارد جوابگوی تقریب موردنظر بوده است:

$$y = f(x) = ax^6 + bx^5 + cx^4 + dx^3 + ex^2 + fx + cte. \quad (۹)$$

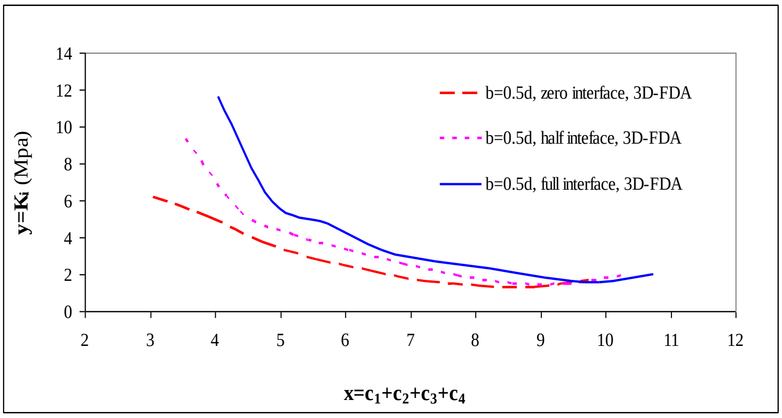
در این رابطه ضرایب ثابت a، b، c، d، e و f و مقدار ثابت .cte براساس محاسبات خم‌آمایی صورت‌گرفته بر نتایج تحلیل عددی تفاضل محدود سه‌بعدی می‌باشد، که برای شرایط مختلف، نمودارهای آنها در شکل‌های (٦) تا (۲۰) و مقادیر آنها همگی در جدول (۲) درج شده است. ضریب تعیین یا نمایهٔ هم‌بستگی، R^2 این چندجمله‌ای‌ها که عددی مابین بازهٔ صفر و یک هستند، همواره بزرگ‌تر از ۰/۹ (به‌معنی خم‌آمایی رضایت‌بخش) محاسبه شده‌اند. رابطهٔ R^2 به‌شکل زیر تعریف می‌گردد:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n}\left(y_i - y(x_i)\right)^2}{\sum\left(y_i - \langle y_i\rangle\right)^2} \quad (۱۰)$$

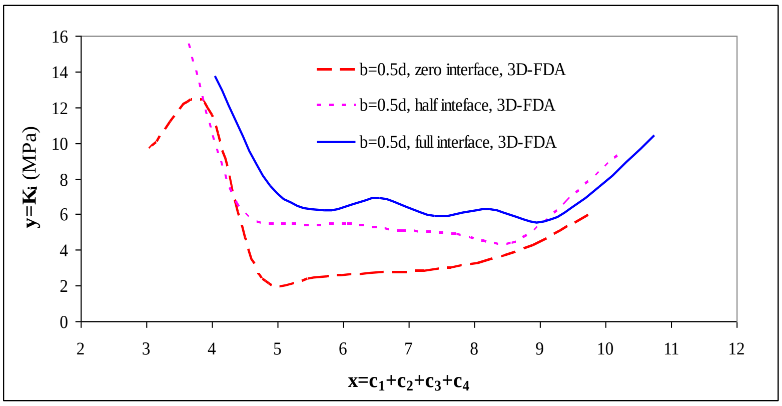
که در این رابطه

$$\langle y_i\rangle = \frac{\sum_{i=1}^{n} y_i}{n} \quad (۱۱)$$

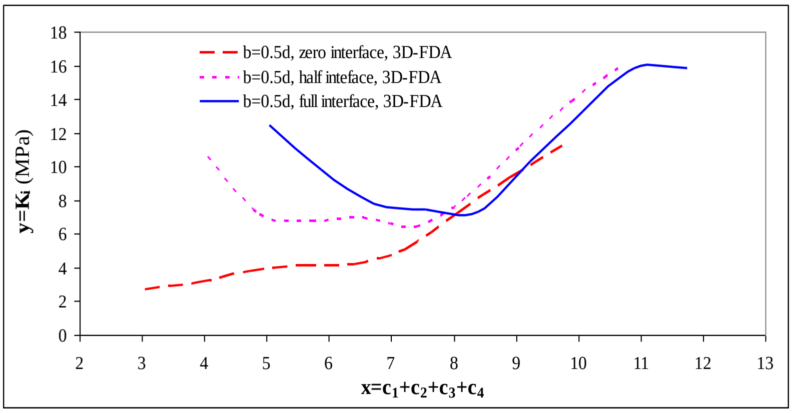
برابر میانگین n دادهٔ تابعی y_i از متغیرهای x_i می‌باشد.



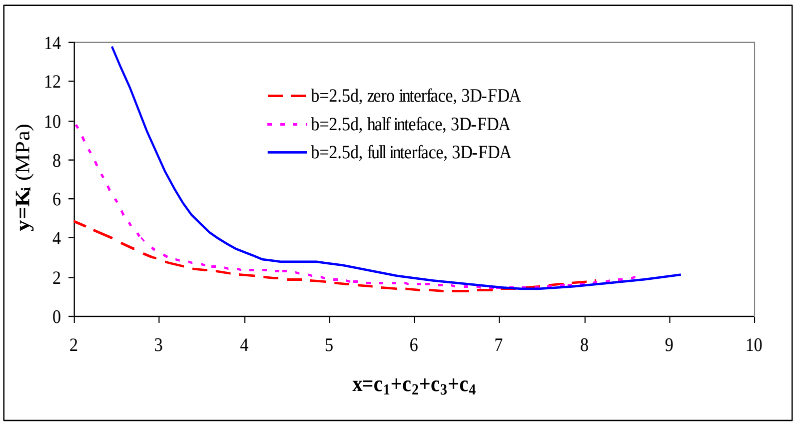
شکل ٦ نمودار سختی جانبی– پارامترهای بدون بعد، برای مؤلفهٔ چسبندگی خاک درمجاورت شیب b=0.5d



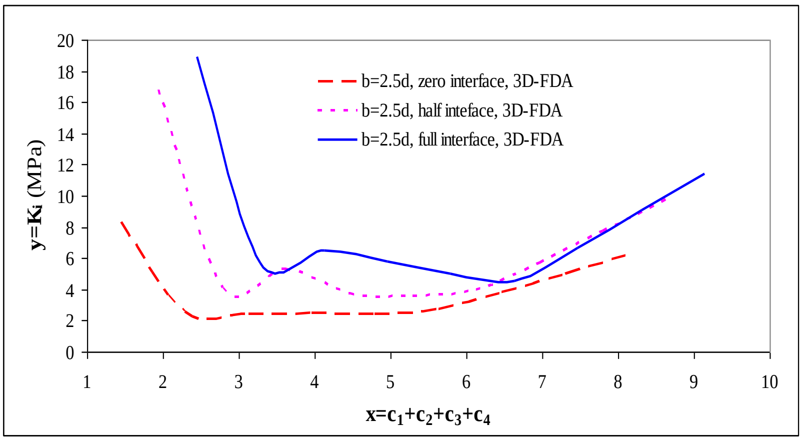
شکل ۷ نمودار سختی جانبی– پارامترهای بدون بعد، برای مؤلفهٔ اصطکاکی خاک درمجاورت شیب b=0.5d



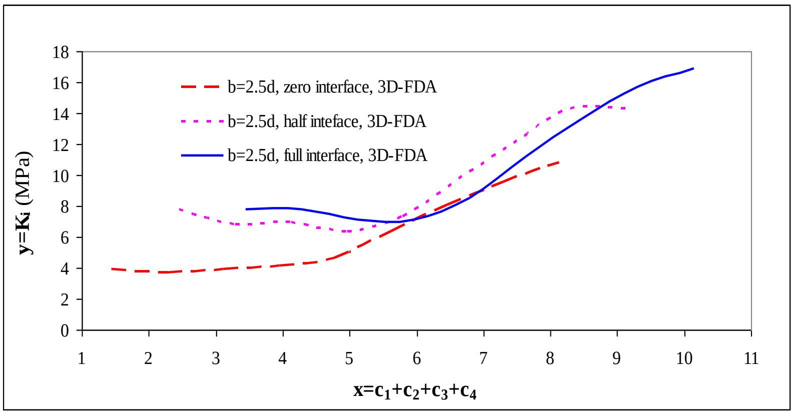
شکل ۸ نمودار سختی جانبی– پارامترهای بدون بعد، برای مؤلفهٔ چسبنده –اصطکاکی خاک درمجاورت شیب b=0.5d



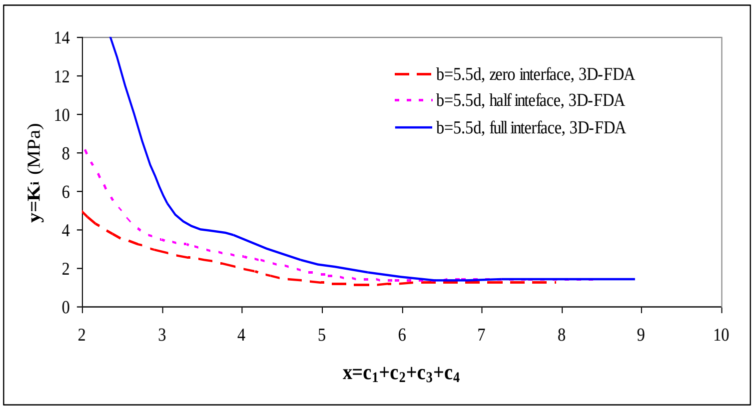
شکل ۹ نمودار سختی جانبی– پارامترهای بدون بعد، برای مؤلفهٔ چسبندگی خاک درمجاورت شیب b=2.5d



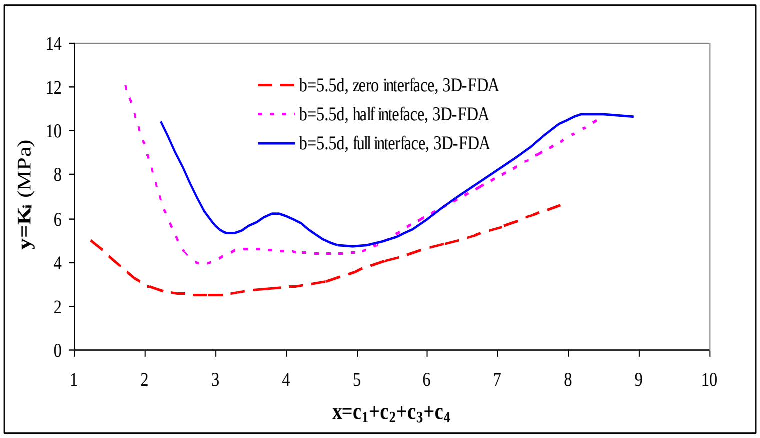
شکل ۱۰ نمودار سختی جانبی– پارامترهای بدون بعد، برای مؤلفهٔ اصطکاکی خاک درمجاورت شیب b=2.5d



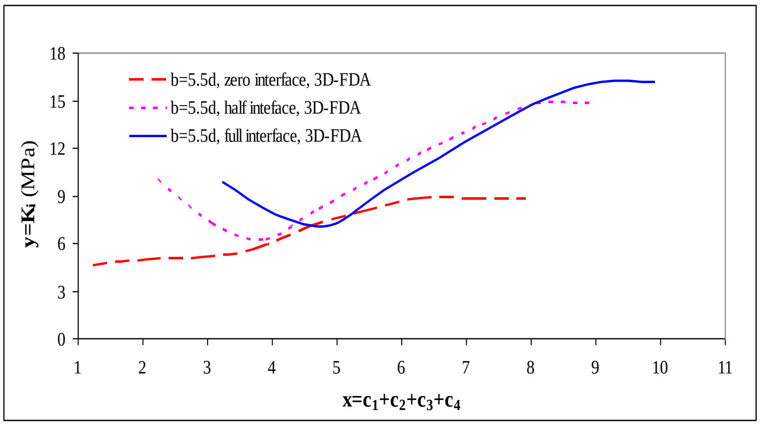
شکل ۱۱ نمودار سختی جانبی- پارامترهای بدون بعد، برای مؤلفهٔ چسبنده – اصطکاکی خاک درمجاورت شیب b=2.5d



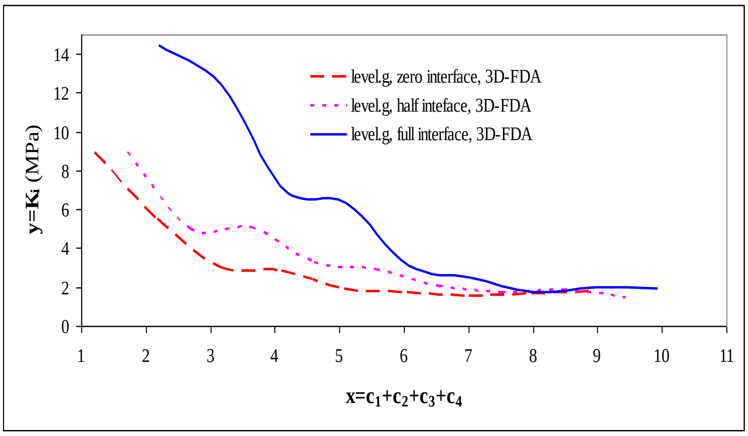
شکل ۱۲ نمودار سختی جانبی– پارامترهای بدون بعد، برای مؤلفهٔ چسبندگی خاک درمجاورت شیب b=5.5d



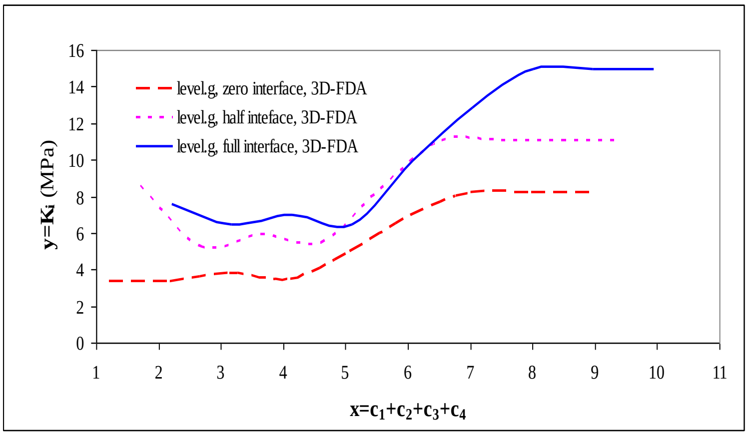
شکل ۱۳ نمودار سختی جانبی– پارامترهای بدون بعد، برای مؤلفهٔ اصطکاکی خاک درمجاورت شیب b=5.5d



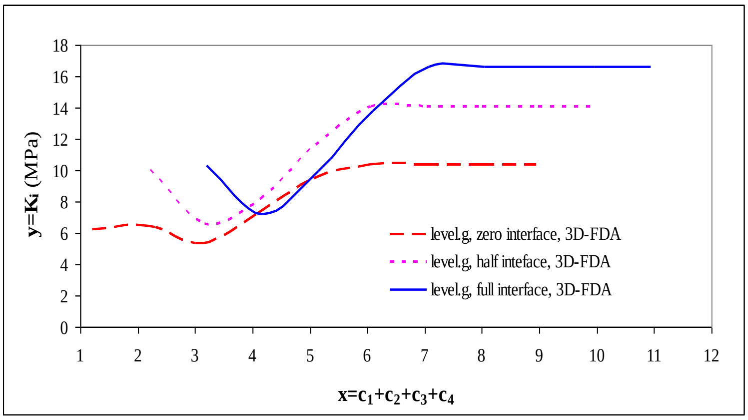
شکل ۱٤ نمودار سختی جانبی– پارامترهای بدون بعد، برای مؤلفهٔ چسبنده – اصطکاکی خاک درمجاورت شیب b=5.5d



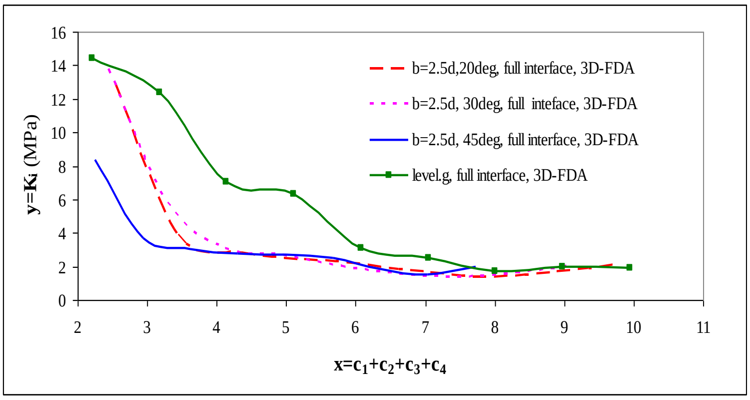
شکل ۱۵ نمودار سختی جانبی- پارامترهای بدون بعد، برای مؤلفهٔ چسبندگی خاک در زمین مسطح



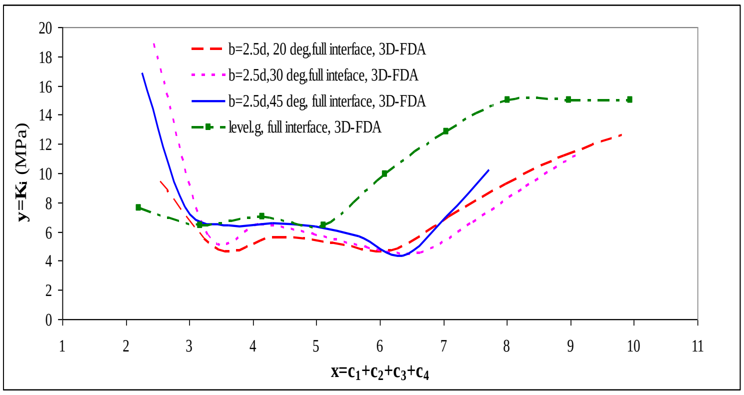
شکل ۱٦ نمودار سختی جانبی- پارامترهای بدون بعد، برای مؤلفهٔ اصطکاکی خاک در زمین مسطح



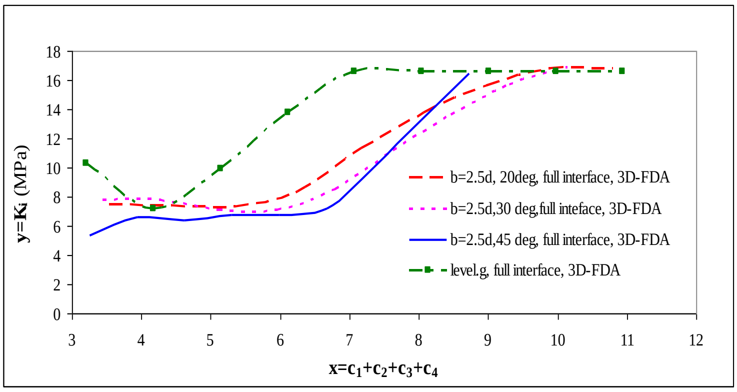
شکل ۱۷ نمودار سختی جانبی- پارامترهای بدون بعد، برای مؤلفهٔ چسبنده- اصطکاکی خاک در زمین مسطح



شکل ۱۸ نمودار سختی جانبی– پارامترهای بدون بعد، برای مؤلفهٔ چسبندگی خاک در زمین مسطح و شیب‌های مختلف



شکل ۱۹ نمودار سختی جانبی– پارامترهای بدون بعد، برای مؤلفهٔ اصطکاکی خاک در زمین مسطح و شیب‌های مختلف



شکل ۲۰ نمودار سختی جانبی– پارامترهای بدون بعد، برای مؤلفهٔ چسبنده–اصطکاکی خاک در زمین مسطح و شیب‌دار

بررسی نحوهٔ استفادهٔ عملی از سختی جانبی در فصل مشترک شمع – خاک

در این قسمت به‌منظور تشریح نحوهٔ کاربرد منحنی‌های سختی جانبی تجربی استخراج‌شده در این تحقیق، در یک مثال عملی طراحی برمبنای عملکرد (Performance Based Design:PBD) ارائه شده است، عملکرد موردنظر در این بخش محدود کردن مقدار تغییرمکان جانبی در سرشمع y(z=0) براساس محدودیت‌های طراحی می‌باشد. هدف از

ارائهٔ این مثال تشریح چگونگی کاربرد منحنی‌های سختی جانبی K_i تابع عمق در تعیین ظرفیت باربری جانبی شمع و نیز تعیین ظرفیت خمشی لازم برای یک تغییرمکان جانبی دل‌خواه در سطح زمین می‌باشد. شمعی با طول Lp متر و قطر d متر در زمینی مسطح مفروض است. چسبندگی خاک c (kPa)، وزن مخصوص مؤثر آن γ' kN/m^3 و زاویهٔ اصطکاک داخلی آن ϕ(deg) است، اندازه‌گیری‌ها در خاک پیرامون شمع نشان می‌دهد که در اثر فرایند نصب شمع، چسبندگی و زاویهٔ اصطکاک خاک در محل فصل مشترک شمع- خاک به نصف کاهش یافته است.

جدول ۲ ضرایب چندجمله‌ای برآورد سختی جانبی برای شرایط شیب- زمین افقی، فاصلهٔ مجاورت b و فصل مشترک شمع- خاک مختلف

ثابت‌های معادله / شرایط محاسبه	a ($:ax^6$)	b ($:bx^5$)	c ($:cx^4$)	d ($:dx^3$)	e ($:ex^2$)	f ($:fx$)	cte.	R^2
b=0.5d, c, zero	-	-	-0.0007	0.0237	-0.1257	-1.3737	10.969	0.9978
0.5d, c, half	-	-	0.0261	-0.7617	8.2927	-40.5	78.392	0.9961
0.5d, c, full	-	-	0.0364	-1.158	13.701	-71.958	145.3	0.9924
b=0.5d, phi, zero	-0.0368	1.4716	-23.937	201.91	-927.66	2188.5	-2051.7	0.9708
0.5d, phi, half	0.0016	-0.0973	2.293	-27.088	170.89	-550.11	715.47	0.9973
0.5d, phi, full	-0.0016	0.0568	-0.6602	1.9007	17.846	-140.54	286.8	0.9880
b=0.5d, c-phi, zero	0.0030	-0.1237	2.0621	-17.554	80.282	-186.28	173.87	0.9993
0.5d, c-phi, half	0.0079	-0.3667	6.9717	-69.052	375.93	-1068	1246.1	0.9979
0.5d, c-phi, full	0.0035	-0.1804	3.7577	-40.606	241.16	-752.08	980.21	0.9959
b=2.5d, c, zero	-	-	0.0043	-0.0985	0.9628	-4.7755	11.008	0.9943
2.5d, c, half	-	-	0.0473	-1.1174	9.6413	-36.108	51.535	0.9879
2.5d, c, full	-	-	0.055	-1.4217	13.539	-56.539	89.756	0.9941
b=2.5d, phi, zero	0.006	-0.1939	2.522	-16.778	60.090	-109.74	82.227	1.000
2.5d, phi, half	0.0228	-0.7731	10.596	-74.698	284.90	-556.88	440.47	0.9924
2.5d, phi, full	0.0187	-0.7092	10.919	-86.916	376.34	-839.6	760.17	0.9986
b=2.5d, c-phi, zero	0.004	-0.1159	1.3041	-7.2873	21.398	-31.234	21.415	0.9995
2.5d, c-phi, half	0.0055	-0.194	2.737	-19.595	75.346	-148.48	124.77	0.9970
2.5d, c-phi, full	0.0010	-0.0337	0.367	-1.1934	-4.3285	34.259	-47.159	0.9998
b=5.5d, c, zero	-	-	0.0188	-0.422	3.5447	-13.405	20.869	0.9945
5.5d, c, half	-	-	0.0335	-0.7878	6.8165	-25.933	38.639	0.9866
5.5d, c, full	-	-	0.0633	-1.6044	14.894	-60.263	91.887	0.9835
b=5.5d, phi, zero	0.0022	-0.0634	0.7283	-4.3257	14.274	-24.999	20.666	0.9990
5.5d, phi, half	0.0133	-0.4295	5.5817	-37.258	134.65	-249.87	190.52	0.9980
5.5d, phi, full	0.0132	-0.4621	6.4946	-46.80	182.35	-364.95	299.62	0.9841
b=5.5d, c-phi, zero	-0.0009	0.0327	-0.4608	3.0868	-10.107	15.575	-4.0187	0.9985
5.5d, c-phi, half	-0.0066	0.2196	-2.9093	19.411	-67.168	111.02	-58.183	0.9983
5.5d, c-phi, full	-0.0047	0.1867	-2.9890	24.495	-106.90	232.48	-186.2	0.9985
level, c, zero	-	-	0.0083	-0.2086	1.9980	-8.8037	17.002	0.9920
level, c, half	-	-	0.0089	-0.2243	2.1198	-9.3912	19.620	0.9663
level, c, full	-	-	-0.0116	0.2821	-2.0822	2.7795	15.870	0.9820
level, phi, zero	0.0029	-0.0813	0.8850	-4.6542	12.4790	-16.026	11.030	0.9955
level, phi, half	0.0026	-0.0791	0.9719	-6.1797	22.295	-44.126	42.463	0.9647
level, phi, full	0.0034	-0.1134	1.4949	-9.8810	35.076	-64.574	55.537	0.9909
level, c-phi, zero	-0.005	0.1617	-2.0305	12.5310	-39.053	57.139	-23.979	0.9986
level, c-phi, half	-0.0025	0.0818	-1.0247	5.7616	-12.551	-0.5776	30.768	0.9982
level, c-phi, full	-0.0018	0.0645	-0.873	4.9536	-6.5736	-33.960	95.836	0.9987
2.5d, full, 20deg, c	-	-	0.0523	-1.4123	13.910	-59.230	94.186	0.9768
2.5d, full, 30deg, c	-	-	0.0550	-1.4217	13.539	-56.539	89.756	0.9941
2.5d, full, 45deg, c	-	-	0.1031	-2.206	17.161	-57.747	73.815	0.9918
2.5d, full, level c	-	-	-0.0116	0.2821	-2.0822	2.7795	15.870	0.9820
2.5d, full, 20deg, phi	0.0098	-0.3774	5.8483	-46.575	200.75	-443.84	398.62	0.9966
2.5d, full, 30deg, phi	0.0187	-0.7092	10.9190	-86.916	376.34	-839.60	760.17	0.9986
2.5d, full, 45deg phi	-0.0175	0.4472	-4.1915	16.359	-13.037	-71.841	142.17	0.9955
full, level, phi	0.0034	-0.1134	1.4949	-9.8810	35.076	-64.574	55.537	0.9909
2.5d,full,20deg,c-phi	-0.0024	0.1107	-2.0973	20.494	-107.92	289.05	-299.98	0.9994
2.5d,full,30deg,c-phi	0.001	-0.0337	0.3670	-1.1934	-4.3285	34.259	-47.159	0.9998
2.5d,full,45deg,c-phi	-0.010	0.3384	-4.6859	34.3140	-140.81	307.89	-274.0	0.9970
full, level, c-phi	-0.0018	0.0645	-0.8730	4.9536	-6.5736	-33.960	95.836	0.9987

مقادیر منحنی‌های p-y به‌شکل تابع عمق p(z)-y(z) از عمق سطح زمین (z=0) تا کف شمع (z=Lp) در نموهای یک‌متری به‌کمک مقادیر K_i (z) ارائه‌شده در نمودارهای قبلی و رابطهٔ هذلولوی شمارهٔ (۱)، پس از آن، برای انجام طراحی سازه‌ای شمع، لنگر خمشی در طول شمع بااستفاده از مقادیر p(z)-y(z) هذلولوی محاسبه می‌گردد. تابع تغییرشکل مجاز شمع در طول آن y(z) نیز با رابطهٔ زیر داده شده است:

$$y(z) = Ae^{(-A\frac{z}{d})} = 0.01e^{(-0.01\frac{z}{d})} \quad (۱۲)$$

که در این رابطه A برابر دامنهٔ حداکثر تغییرمکان جانبی دل‌خواه در طول شمع در سطح زمین (z/d=0.0) برحسب سانتی‌متر است، که در این مثال معادل ۱ سانتی‌متر فرض شده است. پس مقدار عکس‌العمل خاک p در عمق z (یعنی p(z)) براساس تئوری وینکلر [1] از رابطهٔ زیر قابل محاسبه است:

$$p(z) = \frac{1}{d}\frac{\partial^2 M(z)}{\partial z^2} = \frac{y(z)}{\left(\frac{1}{K_i(z)}\right) + \frac{y(z)}{p_u(z)}} \quad (۱۳)$$

یا به عبارت دیگر تغییرشکل جانبی شمع براساس مقدار لنگر خمشی در شمع عبارت است از:

$$y(z) = \frac{1}{E_p I_p}\iint M(z).dz.dz + y'_0.z + y_0 \quad (۱٤)$$

که در این رابطه y_0 تغییرشکل مرزی در سرشمع است. از طرفی، اهتمام بر آن است که از رابطهٔ (۱۳) استفاده شود، چرا که برخلاف رابطهٔ معادل (۱٤) که فقط لنگر خمشی و تغییر شکل جانبی شمع را به هم مرتبط می‌کند، سختی جانبی K_i و مقدار عکس‌العمل خاک به شکل‌های نهایی p_u و p نیز در رابطهٔ (۱۳) وارد شده است. همچنین روابط محاسبهٔ مقدار p_u برای یک خاک مختلط چسبنده – اصطکاکی $c-\phi$ در زمین مسطح (بدون شیب) به شرح زیر است [4]:

$$p_u(z) = p_{ult} = \overline{A}p_{ult\phi} + p_{ultc} \quad (۱٥)$$

در این رابطه مقدار $\overline{A}$ برحسب عمق به قطر شمع z/d از گراف موجود در مرجع [4] و یا از رابطهٔ زیر که براساس برازش گراف موجود در مرجع [4] به‌دست آمده، محاسبه می‌شود:

$$\begin{aligned}\overline{A} &= \overline{A}(z) = 0.0025(z/d)^4 - 0.0743(z/d)^3 \\ &+ 0.7933(z/d)^2 - 3.5086(z/d) + 6.6928 \\ R^2 &= 0.9906\end{aligned} \quad (۱٦)$$

همچنین در رابطهٔ (۱٥) مقدار $p_{ult\phi}$ برای زمین مسطح، معادل کوچک‌ترین مقدار حاصل از رابطه‌های زیر است [4]:

$$p_{ult\phi} = \gamma z\left[\begin{aligned}&\frac{K_0\tan\phi\sin\beta}{\tan(\beta-\phi)\cos\alpha} + \\ &+ \frac{\tan\beta}{\tan(\beta-\phi)}(d + z\tan\beta\tan\alpha)\end{aligned}\right] + \gamma z\left[K_0 z\tan\beta(\tan\phi\sin\beta - \tan\alpha) - K_a d\right] \quad (۱۷)$$

$$p_{ult\phi} = K_a d\gamma z(\tan^8\beta - 1) + K_0 d\gamma z\tan\phi\tan^4\beta \quad (۱۸)$$

$$\text{data}: \begin{aligned} K_0 &= 1 - \sin\phi = 1 - \sin 20 = 0.66 \\ K_a &= \tan^2(45 - \phi/2) = 0.49 \\ \beta &\approx 45 + \phi/2 = 55^\circ \\ \alpha &= \phi/2 = 10^\circ \\ \phi &= \phi_{soil} = 20^\circ \end{aligned} \quad (۱۹)$$

و p_{ultc} نیز در زمینی مسطح برابر کوچک‌ترین مقدار حاصل از دو رابطهٔ زیر است [4]:

$$p_{ultc} = \left(3 + \frac{\gamma'}{c}z + \frac{J}{b}z \le 9\right)cd \quad (۲۰)$$

$$p_{ultc} = 9cd \quad (۲۱)$$

که در رابطهٔ (۲۰) J ثابتی است که عمق را کنترل می‌کند، براساس پیشنهاد بوشان [19] معادل ۲/۰ برای رس

سخت فرض می‌گردد. همچنین متلاک [15] مقدار J را برای رس نرم برابر ۰/۵ و حدود ۰/۲۵ برای رس متوسط درنظر گرفته است. مقدار ۰/۵ به‌طور متناوب مورداستفاده قرار گرفته است. رییز و ولِچ [16] مقدار J را برابر ۰/۵ فرض کرده‌اند.

اما $p_{ult\phi}$ و p_{ultc} که به‌ترتیب از روابط (۱۷) و (۱۸) و نیز (۲۰) و (۲۱) در بالا به‌دست می‌آید، برای زمین مسطح ارائه شده است، برای تبدیل آنها به مقادیر مناسب برای زمین شیب‌دار، از ضرایب تصحیح مطرح‌شده در مراجع [14–۱۲] استفاده شود. درنهایت رابطهٔ محاسبهٔ مقدار لنگر خمشی در طول شمع برحسب عمق z ، M(z) پس از دو بار انتگرال‌گیری برای حذف عامل مشتق مرتبهٔ دوم در رابطهٔ (۱۳) در قبل، به شکل زیر قابل بیان است:

$$M(z) = d\left(\iint \frac{y(z)}{\left(\frac{1}{K_i(z)}\right)+\frac{y(z)}{p_u(z)}}.dz.dz + M'_0.z + M_0\right)$$

(۲۲)

که در این رابطه M_0 و مشتق آن، مقدار لنگر خمشی از نوع شرایط مرزی در سرشمع، بسته به نوع بارگذاری می‌باشد. $K_i(z)$ نیز به شکل زیر از شکل (۱۷) در قبل به‌دست می‌آید، این پارامتر نیز تابعی از عمق z خواهد بود:

$$\begin{aligned} K_i(z) = y &= -0.0025x^6 + 0.0818x^5 - 1.0247x^4 + \\ &+ 5.7616x^3 - 12.551x^2 - 0.5776x + 30.768 \\ R^2 &= 0.9982 \\ x &= c_1 + c_2 + c_3 + c_4 \end{aligned}$$

(۲۳)

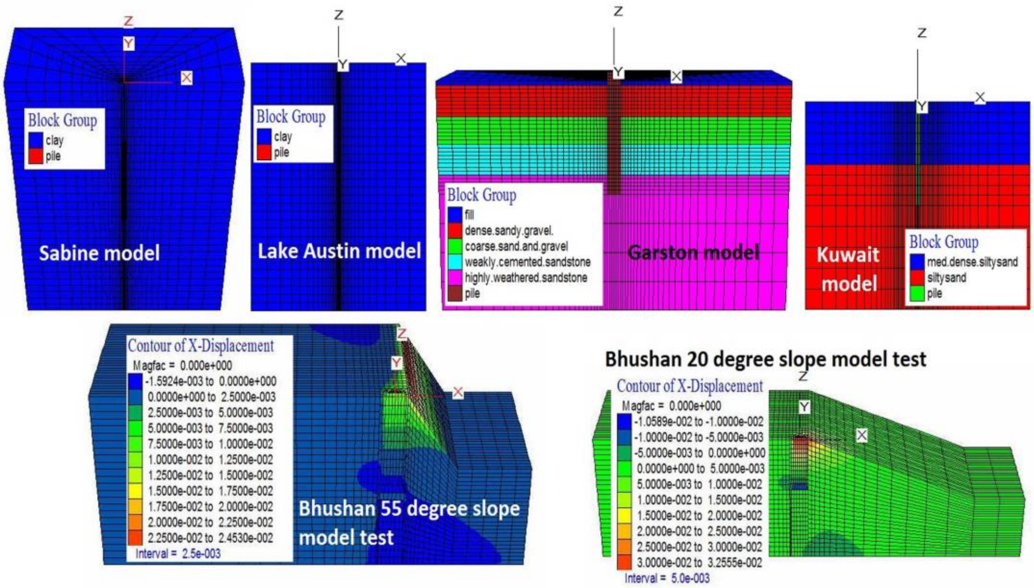
انتگرال‌های پیاپی موجود در رابطهٔ (۲۲) را می‌توان پس از ساده‌سازی، به‌کمک راه‌حل‌های تحلیلی یا عددی حل کرد. چنانچه در روابط این بخش مشاهده شد، کلیهٔ روابط تأثیرگذار ازجمله به‌ترتیب روابط شمارهٔ (۱۲)، (۱۳)، (۱۵)، (۱٦) تا (۲۳) همگی برحسب یک عامل متغیر نوشته شده‌اند و آن هم عامل عمق از سطح زمین z می‌باشد؛ به‌طوری‌که در مراجع [14–۱۲] و نیز نتایج آزمایشی بزرگ‌مقیاس مرجع [4] می‌توان دید، تمامی منحنی‌های p-y به‌طورکلی تابعی از عمق می‌باشند و تلاش برای ارائهٔ هر راه‌حلی برای استخراج آنها برحسب عامل عمق، تا حد زیادی به واقعیت و طبیعت مسئلهٔ شمع‌های تحت بار جانبی نزدیک خواهد شد.

صحت‌سنجی روش عددی

به‌منظور صحت‌سنجی روش عددی سه‌بعدی استخراج منحنی‌های p-y در این مطالعه، شش آزمایش تمام‌مقیاس معتبر بین‌المللی بارگذاری جانبی شمع تحت شرایط مختلف [15-21] با روش همین تحقیق مدل‌سازی شده و نتایج آنها با نتایج آزمایش‌های تمام‌مقیاس [15-19] و روابط سایر محققان [5, 6, 20, 21] مقایسه شده است. آزمایش شمارهٔ (۱) آزمایش بارگذاری جانبی شمع Sabine [4,15] روی شمعی فولادی به‌طول ۱۲/۸ متر است، که در خاک رس نرم در زمینی مسطح کوبیده‌شده است. آزمایش شمارهٔ (۲) مربوط به همین شمع فولادی است [4,16] که در زمین مسطح متشکل از خاک رسی سخت کوبیده‌شده است. آزمایش شمارهٔ (۳) مربوط به آزمایش شمع بتنی گارستون [4,17] به‌طول ۱۲/۵ متر و قطر ۱/۵ متر می‌باشد که در زمین مسطح و خاک ماسه‌ای اجرا شده است. آزمایش (٤) تست بارگذاری جانبی انجام‌شده توسط اسماعیل [4,18] در کشور کویت برروی شمعی بتنی به طول ۵ متر در خاک ماسهٔ سیمانته شده (یعنی خاک دارای چسبندگی و اصطکاک داخلی همزمان نوع $c-\phi$) و در زمین مسطح می‌باشد. آزمایش‌های شمارهٔ (۵) و (٦) آزمایش‌های بوشان [19] برروی شمع‌های کوتاه بتنی درجا- ریز مجاور شیب‌های خاکی به‌ترتیب ۲۰ و ۵۵ درجه در خاک رس سخت (رس سیلتی و ماسهٔ سیمانته) می‌باشد. برای فصل مشترک شمع - خاک در مدل‌سازی عددی این آزمایش‌ها نیز از معیار

مقاومت برشی کولمب استفاده شده است. خلاصه‌ای از مشخصات خاک و شمع در این آزمایش‌ها در جدول (۳) ارائه شده است.

توافق خوبی بین نتایج آزمایشی و نتایج عددی حاصل از روش این تحقیق مشاهده می‌شود. نمودارهای مقایسهٔ نتایج مدل‌سازی عددی این شش آزمایش به‌ترتیب در شکل‌های (۲۲) تا (۲٤) نمایش‌داده شده‌اند. در این جدول e معرف فاصلهٔ بین محل اعمال بار تا سطح خاک در طول شمع (خروج از مرکزیت بارگذاری در سرشمع)، t_w ضخامت جداره در شمع‌های فولادی لوله‌ای و E_{50} مدول ارتجاعی خاک چسبنده در ۵۰ درصد مقاومت محوری آن براساس کرنش ε_{50} در آزمایش‌های سه‌محوری می‌باشد. سایر پارامترها نیز قبلاً در روابط و شکل‌ها تعریف شده‌اند.

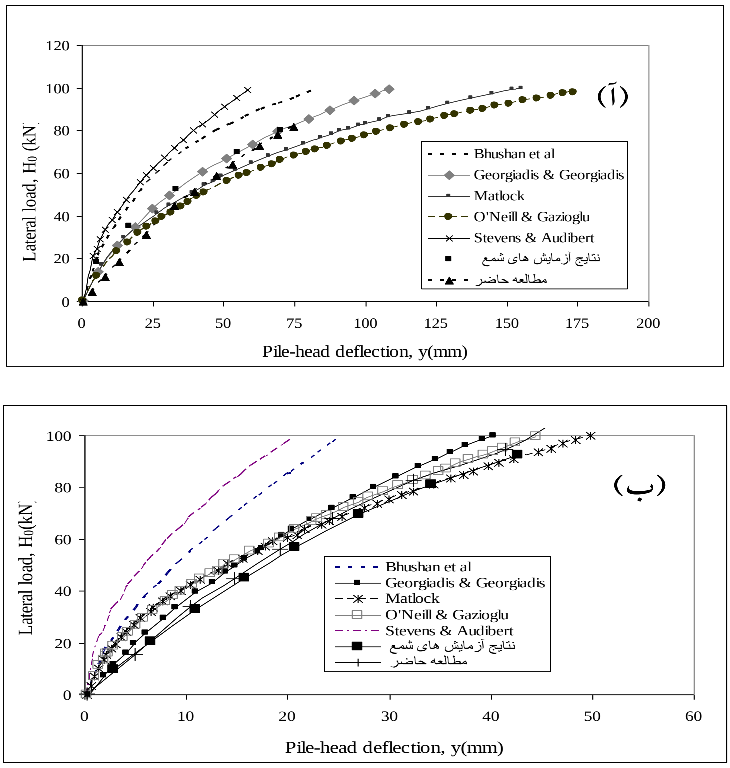


شکل ۲۱ مدل‌های عددی سه‌بعدی تفاضل محدود شش آزمایش مطرح‌شده برای صحت‌سنجی نتایج تحقیق (تغییرمکان‌ها برحسب متر)

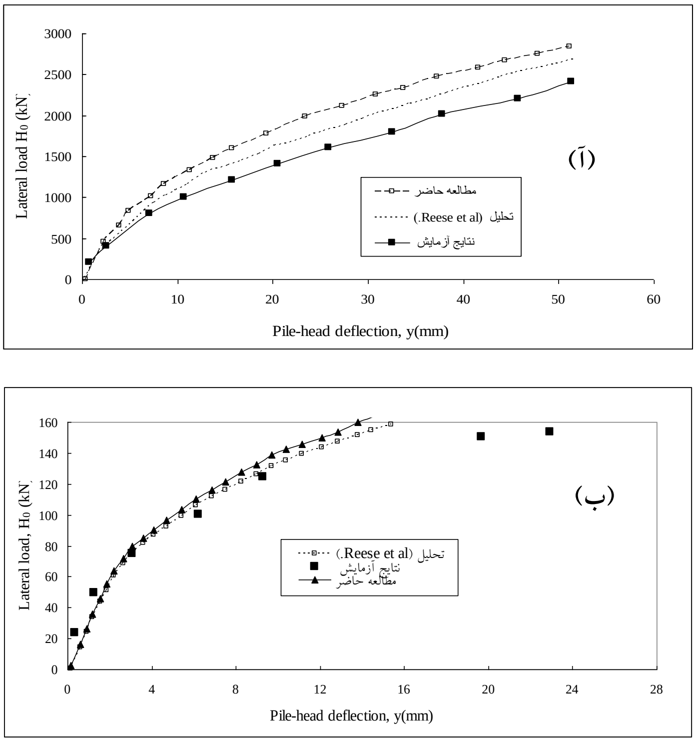
جدول ۳ خلاصهٔ مشخصات شمع و خاک در آزمایش‌های مختلف مورداستفاده در صحت‌سنجی روش عددی مطالعهٔ حاضر

	مشخصه‌های مکانیکی و هندسی شمع (بتنی یا فولادی)							مشخصات خاک			
شماره آزمایش #	L (m)	d (m)	E_pI_p kN.m^2	e (m)	θ (deg)	t_w mm	نوع خاک	C (or C_u) (kPa)	E (or E_{50}) (kPa)	ϕ (deg)	γ (or γ′) (kN/m^3)
1	12.8	0.319	31280	0.305	0°	12.7	c*	14.4	2060	0	5.5
2	12.8	0.319	31280	0.0635	0°	12.7	c*	32.25	2687.5	0	10
3	12.5	1.50	-	0.900	0°	-	ϕ*	0	N_{SPT}	43, 37	
4	5.0	0.30	20200	-	0°	-	c-ϕ*	20 , 0	N_{SPT}	35,43	17.90, 19.10
5	5.185 (17ft)	1.22 (4ft)	2.25×10^6	0.230	20°	-	c*	220	24,440	0	18.85
6	6.710 (22ft)	1.22 (4ft)	2.25×10^6	0.230	55°	-	c*	479	95,800	0	18.85

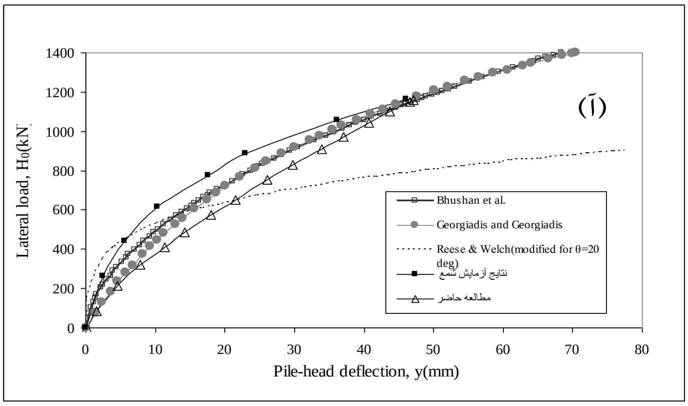
*c–ϕ: خاک چسبنده–اصطکاکی، ϕ : خاک دانه ای دارای اصطکاکی داخلی (خاک دانه‌ای فاقد چسبندگی)، c : نماد خاک چسبنده

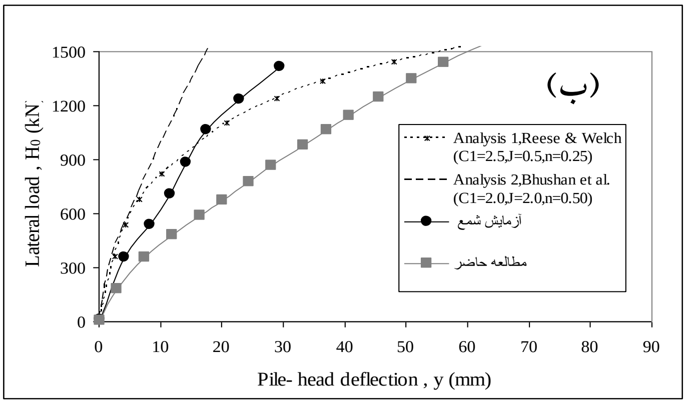


شکل ۲۲ منحنی بار- تغییرشکل جانبی سرشمع برای آزمایش بارگذاری جانبی شمع: (آ) رودخانهٔ Sabine، (ب) دریاچهٔ Lake Austin



شکل ۲۳ منحنی بار- تغییرشکل جانبی سرشمع برای آزمایش بارگذاری جانبی شمع: (آ) Garston در خاک بدون چسبندگی (ماسه)، (ب) Kuwait در خاک ماسهٔ سیمانته شده (یعنی خاک از نوع $c-\phi$)





شکل ٢٤ منحنی بار– تغییرشکل جانبی سرشمع برای شمع‌های حفاری‌شده: (الف) آزمایش بارگذاری جانبی بوشان برای شیب ٢٠ درجه در رس سیلتی سخت (CL-CH)، (ب) آزمایش بارگذاری بوشان در شیب ۵۵ درجه در ماسهٔ سیمانته (SM)

نتیجه‌گیری

در این تحقیق به بررسی اثر مؤلفه‌های مقاومتی فصل مشترک شمع– خاک شامل چسبندگی و اصطکاک داخلی مصالح این ناحیه بر رفتار منحنی‌های p-y و به‌ویژه سختی جانبی بخش ابتدایی این منحنی‌ها پرداخته شده است. هدف عمدهٔ این تحقیق، تمرکز بر محاسبهٔ مقدار سختی جانبی خاک به‌منظور بررسی رفتار اندرکنش جانبی سیستم سازه‌ای شمع– خاک است. منحنی‌های برازش‌دهندهٔ رابطهٔ بین سختی جانبی خاک و اثر چهار پارامتر ثابت تأثیرگذار بر آن در این تحقیق ارائه شده است. چهار پارامتری که به‌شکل بدون بُعد در طرف دوم روابط برآورد سختی جانبی تابع عمق درنظر گرفته شده‌اند، عبارتند از پارامتری که مشخصات هندسی و ارتجاعی شمع را درنظر می‌گیرد، پارامترهایی که نسبت خصوصیات مقاومتی چسبندگی و زاویهٔ اصطکاک داخلی فصل مشترک شمع– خاک را درنظر می‌گیرند و نیز پارامتری که اثر فاصلهٔ بدون بعد (d/b) مرکز شمع تا تاج شیب را درنظر می‌گیرد. اهداف و نتایج عمدهٔ حاصل از تحقیق حاضر را می‌توان به‌شرح زیر برشمرد:

۱. در این تحقیق، منحنی‌های انتقال بار جانبی p-y برای انواع مؤلفه‌های چسبندگی، اصطکاک و اثر توأمان آنها در یک خاک مختلط از نوع $c-\phi$ برای شمع در زمین مسطح و مجاور شیب با فواصل مجاورت مختلف از تاج شیب، محاسبه شده است.

۲. میزان سختی جانبی خاک تابع عمق z در طول شمع بتنی در عمق‌های مختلف برای مؤلفه‌های چسبندگی، مؤلفهٔ اصطکاکی و اثر هم‌زمان هردوی آنها در خاک مخلوط $c-\phi$ به شکلی کاملاً مجزا با لحاظ کردن شرایط مقاومتی مختلف برای فصل مشترک شمع–خاک

محاسبه شده و در پایان منجر به استخراج رابطهٔ تجربی منحنی‌های سختی جانبی K_i در طول شمع به‌ازای بارگذاری مشخص و با لحاظ اثر پارامترهای تأثیرگذار مختلف شده است.

۳. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که سختی جانبی خاک برای همهٔ مؤلفه‌های خاک از قبیل چسبندگی و اصطکاک خاک، همواره با افزایش عمق، روندی افزایشی ندارد، بلکه میزان افزایش یا کاهش سختی جانبی خاک با افزایش عمق، بستگی به میزان نیروی برشی بسیج شده در اطراف شمع دارد، که مقدار آن بستگی به مقدار تغییرمکان جانبی شمع در آن عمق دارد.

٤. رابطهٔ تجربی مابین سختی جانبی خاک و پارامترهای بدون بعد تأثیرگذار بر میزان سختی، در حالت کلی به شکل یک چندجمله‌ای درجه ششم محاسبه شده است. برای مؤلفهٔ چسبندگی خاک، این چندجمله‌ای درجه ششم به چندجمله‌ای درجه چهارم تقلیل می‌یابد. ضریب تعیین R^2 برای تمام منحنی‌های تجربی برابر عددی بزرگ‌تر از ۰/۹ به‌دست آمده، که نشانگر دقت مناسب و رضایت‌بخش خم‌آمایی است.

۵. سختی جانبی محاسبه‌شده در این مطالعه، دارای یکای تنش است و چهار پارامتر ثابت طرف دوم تمام روابط حاصل‌شده، بدون بعد هستند. در حالت کلی باید گفت که به‌لحاظ ابعادی دو طرف رابطه هم‌بعد نیست، که این به‌دلیل ماهیت تجربی رابطهٔ ارائه شده می‌باشد.

٦. اصولاً با افزایش خصوصیات مقاومتی در فصل مشترک شمع- خاک، میزان عکس‌العمل یا فشار خاک p در واحد طول شمع افزایش می‌یابد، که افزایش آن منجر به تغییرات عمده در میزان سختی جانبی خاک و نیز تغییرمکان جانبی شمع می‌گردد. با تغییر مقادیر p و y به‌علت تغییر مشخصه‌های مقاومتی فصل مشترک شمع- خاک، مقادیر پارامترهای ثابت چندجمله‌ای‌های برآورد مقدار K_i نیز دچار تغییر می‌گردد.

۷. نتیجهٔ مهم تحقیق حاضر آن است که رفتار خاک و شمع‌های بتنی در جاریز تحت بار جانبی چه در زمین مسطح و چه در مجاورت شیب، در حالت کلی تابع پارامتر عمق z است، به‌طوری‌که برای تقریب رفتار منحنی‌های اندرکنشی غیرخطی p-y می‌بایستی روابط حاصل به‌شکل تابع عمق ارائه شوند. بنابراین ارائهٔ روابط تخمین K_i، y، p، M و p_u برحسب عمق z در این تحقیق، حاکی از اهمیت عامل عمق می‌باشد.

۸ عامل عمق z در تعیین منحنی‌های p-y در روش‌های کلاسیک و تجربی [4] به‌خوبی در روابط شمع‌های تحت بار جانبی واردنشده، از طرف دیگر روابطی برای تخمین K_i برای شمع‌های مجاور شیب ارائه نشده است، که در این تحقیق به‌تفصیل به آن پرداخته شده است.

مراجع

1. Winkler, E., "Theory of Elasticity and Strength", Prague: Dominicus, (1867).

۲. سازمان امور مقررات ملی ساختمان ایران، «مبحث هفتم مقررات ملی ساختمان: پی و پی‌سازی»، ویرایش سوم، (۱۳۹۲).

3. Itasca, $FLAC^{3D}$, "Fast Lagrangian Analysis of Continua", version 3.00-261: user’s and theory manuals. Minneapolis: Itasca Consulting Group, Inc., (2002).

4. Reese, L.C., Van Impe, W.F., "Single Piles and Pile Group under Lateral Loading", Rotterdam: A. A. Balkema publishers, (2007).

5. Georgiadis, K.,Georgiadis, M., "Un-drained Lateral Pile Response in Sloping Ground", *J Geotech* Geoenviron *Eng* , ASCE, Vol. 136 (11), PP. 1489-500, (2010).

6. Georgiadis, K., and Georgiadis, M., "Development of p-y Curves for Undrained Response of Piles near Slopes", *Journal Computer and Geotechnic*, Vol. 40, PP. 53-61, (2012).

7. Brinkgreve, R.B.J., Swolfs, W.M., "Plaxis 3D Foundation Version 2 User’s Manual", Plaxis BV, Netherlands, (2007).
8. Comodromos, E. M., Papadopoulou, M. C., "Explicit Extension of the p-y Method to Pile Groups in Cohesive soils", *J Computers and Geotechnics,* Vol. 47, PP. 28-41, (2013).
9. Comodromos, EM., Papadopoulou, MC., "On the Response Prediction of Laterally Loaded Fixed - head Pile Groups in Sands", *Journal Computers and Geotechnics,* Vol. 37, PP. 903-41, (2010).
10. Nimityongskul, N., Barker, P., Ashford, SA., "Effects of Soil Slope on Lateral Capacity of Piles in Cohesive and Cohesionless Soils", Final report of a research project funded by Caltrans under facilities contract No. 59A0645, The Kiewit center for infrastructure and transportation ,Oregon state university, USA, March (2012).
11. Poulos, HG., Davis, EH., "Pile Foundation Analysis and Design", John Wiley, New York, (1980).
۱۲. شمس ملکی، یزدان، «بررسی عددی شمع‌های قائم تحت بارجانبی و استخراج منحنی‌های طراحی p-y در حالات خاص»، پایان‌نامهٔ کارشناسی ارشد، دانشکدهٔ فنی مهندسی، دانشگاه رازی کرمانشاه، (مهرماه ۱۳۹۲).
13. Sharafi, H., Shams Maleki, Y., "p-y Curves in $c-\phi$ Soils by Considering Pile-soil Interface Properties Effects", *Electerical Journal of Geotechnical Engineering*, EJGE, Vol. 19(D), PP. 955-970, (2014).
14. Sharafi, H., Shams Maleki, Y., Karimpour-Fard, M., "Three Dimensional Finite Difference Modeling of Static Soil-pile Interactions to Calculate p-y Curves in Pile-Supported Slopes", *Arab J Geosci, Springer AJGS,* DOI 10.1007/s12517-015-2051-9, PP:1-16 (2015).
15. Matlock, H., "Correlations for Design of Laterally Loaded Piles in Soft Clay", *Proceedings of 2nd Annual Offshore Technology Conference,* Paper No. OTC 1204, Houston, Texas, PP. 577-9, (1970).
16. Reese, LC., Welch, RC., "Lateral Loading of Deep Foundations in Stiff Clay", *Journal Geotechnical Engineering Division,* ASCE, Vol. 101(7), PP.633-49, (1975).
17. Price, G., Wardle, I. F., "Lateral Load Tests on Large Diameter Bored Piles", Contractor report, Transport and road research laboratory, Department of transport, Crowthorne; Berkshire, England, PP. 45-6, (1987).
18. Ismael, NF., "Behavior of Laterally Loaded Bored Piles in Cemented Sands", *Journal Geotech Engrg ,* ASCE, Vol. 116(11), PP. 1678-99, (1999).
19. Bhushan, K., Haley, SC, Fong, PT., "Lateral Load Tests on Drilled Piers in Stiff Clays", *Journal Geotech Engrg Div,* Vol.105, No, 8, PP. 969-85, (1979).
20. Stevens, J. B., Audibert, J. M. E., "Re-examination of p-y Curve Formulation", *Proceedings of the 11th Offshore Technology Conf, OTC,* Houston , PP. 397-403, OTC 3402, (1980).
21. O’Neil, M. W., Gazioglu, S. M., "An Evaluation of p-y Relationships in Clays", Report Prepared for the American Petroleum Institute (API), University of Houston, Tex, (1984).